光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024011101

一种高灵敏度大动态范围的红外焦平面异形读出电路的设计

乔柏全[1,2,3,4]，汪鸿祎[1,2,3]，景　松[1,2]，黄松垒[1,2*]，龚海梅[1,2*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室，上海 200083；
3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 上海科技大学，上海 200083）

摘　要： 针对短波红外焦平面探测器高灵敏度、大动态范围的发展需求，设计了一款新型的红外焦平面异形读出电路。传统的像元只使用一种输入级，难以兼顾高灵敏度和大动态范围，而在该设计中包含的组合像元使用了CTIA和大动态范围两种输入级，兼顾了其优点。具体布局为每2×2个CTIA输入级模块阵列中间，含有1个直接注入模式/对数模式可切换的大动态范围输入级模块。工作模式有两种，第一种为CTIA输入级模块和直接注入模式的大动态范围输入级模块同时工作；第二种为CTIA输入级模块和对数模式的大动态范围输入级模块同时工作。基于0.18 μm 3.3 V标准CMOS工艺，绘制了CTIA输入级阵列规模为320×256，像元中心距为15 μm的异形电路像元阵列版图。仿真结果表明，异形电路像元通过小积分电容实现了高灵敏度，通过对数光响应输出实现了大动态范围。

关键词： 异形电路像元；读出电路；高灵敏度；大动态范围

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0463－06

Design of An Infrared Focal Plane Special Shaped Readout Circuit with High Sensitivity and Dynamic Range

QIAO Boquan[1,2,3,4], WANG Hongyi[1,2,3], JING Song[1,2], HUANG Songlei[1,2], GONG Haimei[1,2]

(1. State Key Lab. of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, CHN;
2. National Key Lab. of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, CHN;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 4. Shanghai Tech University, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: We designed a new type of infrared focal plane readout circuit with combined pixels to meet the development requirements of both high sensitivity and high dynamic range. The designed circuit can be used for shortwave infrared focal plane detector arrays. Traditional pixels typically use only one input stage, which makes it difficult to balance high sensitivity and high dynamic range. In contrast, combined pixels use a capacitive trans-impedance amplifier (CTIA) input stage along with a high dynamic range input stage, thereby inheriting their advantages. The specific layout of a combined pixel contains one high-dynamic-range input stage located in the middle of every 2×2 CTIA high-sensitivity input stage. This high dynamic range input stage can be switched between direct injection and logarithmic modes. We realized the layout of a 320×256 readout circuit for combined pixel arrays with a 15 μm pitch using a 0.18 μm

收稿日期：2024－01－11.
基金项目：中国科学院青年创新促进会项目(2020245).
* **通信作者：**龚海梅，黄松垒

3.3 V standard CMOS process . Simulation results show that both high sensitivity and a high dynamic range can be achieved using small integral capacitors and a high dynamic range in combination with the logarithmic mode.

Key words: combined pixels; ROIC; high sensitivity; high dynamic range

0 引言

短波红外光电探测器在 1～2.5 μm 波段具有量子效率高、灵敏度高、抗辐射性能好，以及可实现近室温工作等独特优点[1]。红外焦平面读出电路是该类型探测器关键组成部分，其中，高灵敏度大动态范围红外焦平面读出电路具有出色的信息获取能力和环境适应能力，是第三代红外焦平面的重点发展方向[2]。

目前针对电路灵敏度不足采取的解决方案多为使用小积分电容。对于电路动态范围不够所采取的解决方案主要分为共享积分电容、数字像元、多次曝光、多灵敏度和非线性响应等方法[3-6]。共享积分电容方案可分为空间共享和时间共享，前者特点为动态范围扩大但是分辨率降低，后者特点为动态范围扩大但是帧频降低。数字像元方案可分为脉冲频率调制(PFM)、脉冲宽度调制(PWM)和地址时间表示(AER)。多次曝光方案本质为牺牲时间获取更大动态，后期需要图像算法处理。多灵敏度方案实际为集成多个光电探测器或者输入级，牺牲面积获取更大动态，后期需要图像算法处理。非线性响应可分为对数光响应和线性—对数光响应，对数光响应的特点为动态范围很大和信噪比较低，但是工艺失配会引入额外噪声；线性—对数光响应优势为弱信号的响应更好，但相比对数光响应会损失一部分动态范围。

针对上述解决方案，本文提出一种结合多灵敏度和对数光响应方案的高灵敏度大动态范围的红外焦平面异形读出电路。

1 异形读出电路原理和设计

人眼是天然的探测器，可以通过理解人眼的感光机制来改进探测器的设计。人眼的工作原理有两个特点。第一点是多灵敏度：人眼中有对光响应度不同的两种细胞在感光，可以获取到高低光强下不同的信息；第二点是对数响应：人眼在高光强下敏感度较低，不易饱和。根据探测器的工作原理和人眼的工作原理，可以采用多灵敏度和对数光响应相结合的思路来实现高灵敏度大动态范围的信号读出。

考虑到红外探测器对弱信号探测的实用性，输入级配对不必需要一比一的关系，以 CTIA 高灵敏度输入级为主，大动态范围 HDR 输入级为辅，采用四比一的比例来设计像元电路，4 个 CTIA 输入级共用 1 个大动态范围输入级来对动态范围做一个补充，布局为 1 个大动态范围输入级位于 4 个 CTIA 输入级的中央，即是异形电路像元结构，设计结果如图 1 所示。

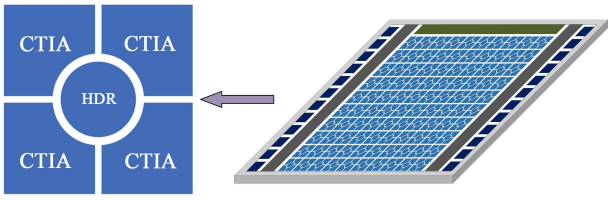


图 1 读出电路像素单元及阵列

大动态范围输入级有直接注入和对数两种可切换的模式，电路像元有两种输出的工作模式。第一种为 CTIA 输入级模块和直接注入模式的大动态范围输入级模块同时工作，第二种为 CTIA 输入级模块和对数模式的大动态范围输入级模块同时工作。

目前对数模式电路输出的思路大都为通过电路结构里的 MOS 管工作在亚阈值区来实现，本文提出一种利用探测器光电二极管中光生电压和辐照功率的对数关系来实现大动态范围的新思路。

典型红外探测器光敏芯片二极管的光生电流和偏压变化的理论曲线如图 2 所示。CTIA 输入级和大动态范围输入级的直接注入模式都工作在上图的第三象限区域。工作原理为给光敏芯片一个零偏或

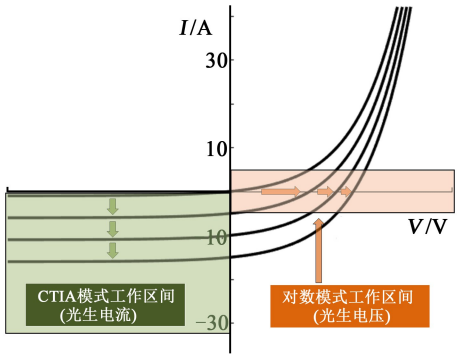


图 2 光电二极管器件原理示意图

者反偏的电压，随着光功率的不断增加，光生电流呈线性增长，然后由读出电路对光生电流积分输出得到信号。

大动态范围输入级的对数模式工作在横轴的正半轴区域。工作原理为随着光功率的不断增加，光生电流会给光敏芯片结电容充电得到一个光生电压，光生电压呈对数增长，然后由读出电路对光生电压直接输出得到信号。

图 3 和图 4 为面积为 1 mm^2 的 InGaAs 光敏芯片的实测数据图。当波长为 1 550 nm 的激光器的光功率在 0～2 mW 的区间逐渐增大时，光敏元光生电流大小以线性模式增长，范围为 2.1×10^{-13}～1.1×10^{-4} A；光生电压大小以对数模式增长，范围为 0～0.4 V。利用这些器件特性可以设计出高灵敏度、大动态范围的读出电路。

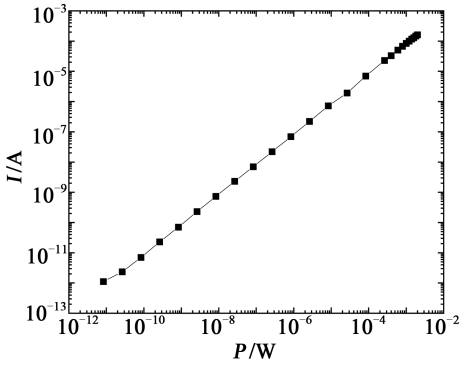


图 3　InGaAs 芯片实测的光生电流和光功率的关系

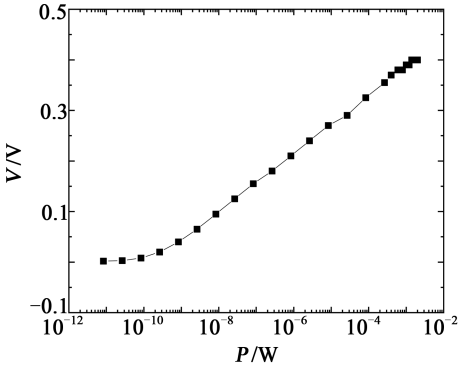


图 4　InGaAs 芯片实测的光生电压和光功率的关系

2　读出电路结构和设计

2.1　读出电路总体架构设计

如图 5 所示，本文基于 0.18 μm3.3 V 标准 CMOS 工艺设计阵列规模为 320×256（每 2×2 个像素阵列中再填充一个大动态范围像素）、像元中心距为 15 μm 的读出电路。整体面阵电路分为模拟信号处理和数字信号时序控制两部分。

模拟信号处理部分包括异形电路像元阵列、列级信号处理电路和总线输出缓冲电路。工作时，异形电路像元阵列将光敏元产生的光生电流或光生电压信号转换为电压信号并进行输出，列级信号处理电路对每列信号进行隔离缓冲，最后通过总线输出缓冲电路实现总线输出。每个异形电路像元阵列包含 4 个 CTIA 输入单元电路和 1 个大动态范围输入单元电路。

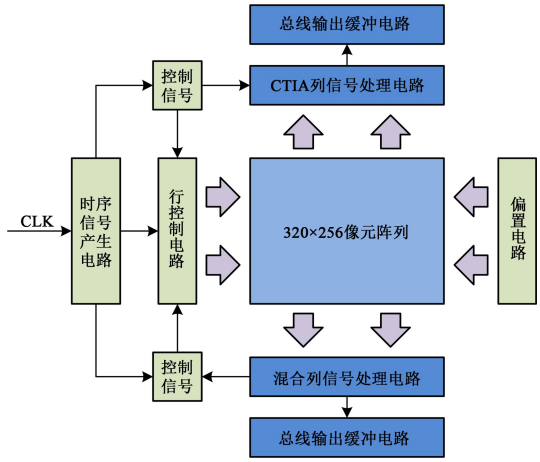


图 5　读出电路总体架构设计图

电路使用了 3 通道输出的工作方式，其中包括 2 个 CTIA 输入级的数据输出通道、1 个大动态范围输入级的数据输出通道。偏置电路为红外焦平面读出电路阵列提供稳定的偏置电压与偏置电流。数字控制电路包括移位寄存器和控制信号产生电路，为红外焦平面读出电路阵列提供预置的时序控制，实现电路不同的工作模式。

2.2　CTIA 输入级的设计

CTIA 输入级的积分电容权衡考虑后取 5 fF，20 fF 两档电容。

复位开关管电路设计时需要考虑其对输入级电路稳定性和精度的影响。稳定性可以通过减小复位截止瞬时电流和增加复位时间来提高。精度需要考虑到沟道电荷注入效应和亚阈值漏电现象。沟道电荷注入效应引入的误差电压可以通过在复位开关管旁串联补偿管（dummy 虚拟管）来有效减小。为了减小复位开关管的亚阈值漏电现象，可以增加一个串联电阻来抑制。

图 6 中 line2 代表沟道电荷注入效应未消除的积分仿真曲线；line1 代表沟道电荷注入效应已消除的积分仿真曲线。

针对 5 fF 极小积分电容的高灵敏探测应用，为

防止积分复位管的漏电对线性度影响，采用 3T 结构，实现漏电抑制。图 7 中 line3 代表亚阈值漏电效应未抑制的积分仿真曲线；line4 代表亚阈值漏电效应已抑制的积分仿真曲线。

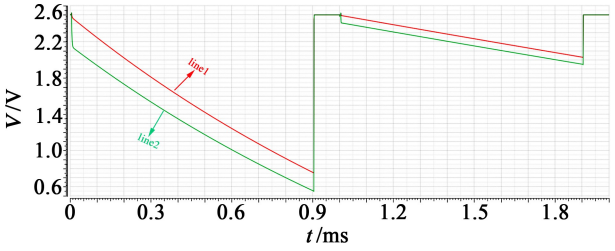


图 6 抑制沟道电荷注入效应的仿真对比图

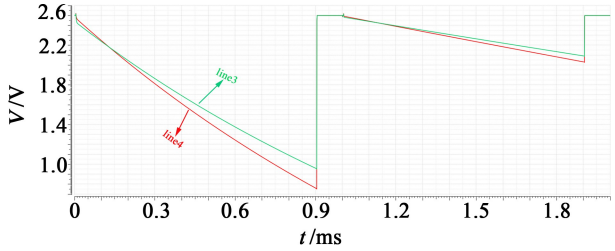


图 7 抑制亚阈值漏电效应的仿真对比图

2.3 大动态范围输入级的设计

大动态范围输入级从典型的 DI 输入级改进而来，由注入开关管、积分电容、复位开关管和开关对管组成，区别为在原有基础上增加开关对管，通过开关来选择不同模式输出，如图 8 所示。

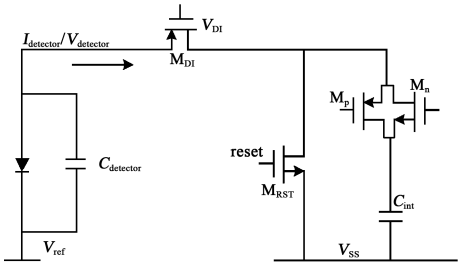


图 8 大动态范围输入级电路示意图

(a)当开关对管断开时，该结构为大动态范围输入级的对数模式。调节注入管的栅极电压 V_{DI} 使其处于饱和区，光电二极管中产生的光生电压不经过采样电容，直接输出。当较小的光生电压输入时，输出电压等于 $V_{ref}+V_{detector}$，仿真结果正常。

在实际工作中，光敏芯片产生的光生电流需要给结电容充电才能达到对应的光生电压并输出。所以根据公式 $I\times t=C\times V$，假设结电容 C 为 200 fF，根据光生电压 V 和光生电流 I 绘制所需充电时间 t 如图 9 所示。由图 9 可知，小的光生电压需要过长的充电时间，当用对数模式对 CTIA 模式的动态范围做一个补充时需要将积分时间设置在毫秒量级以上。

(b)当开关对管导通时，该结构为大动态范围输入级的直接注入 DI 模式。

注入开关管控制对电流信号的读取和关断，电流在积分电容上积分转换为电压，复位开关管负责在积分之前将电容复位放电。电路工作时，M_{DI} 注入管处于亚阈值区，探测器的偏置电压由注入管的栅源电压控制。

$$V_{S,DI}=\zeta V_T\ln(I_D/I_0)+V_{DI} \tag{1}$$

由式(1)可知，器件的偏置电压 $V_{S,DI}$ 只和注入电流 I_D、栅压 V_{DI} 有关系。

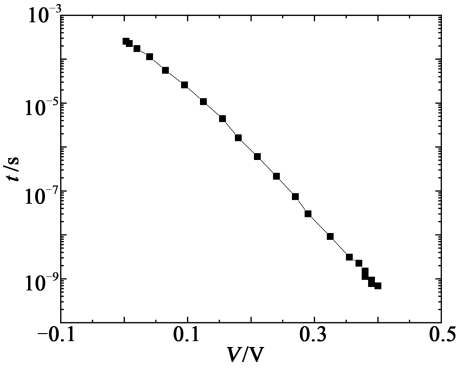


图 9 光生电压与充电时间关系图

在实际设计中，由于注入的电流大小是变化的，偏置电压 $V_{S,DI}$ 也是变化的。根据式(1)，确定 V_{DI} 以后，注入电流越小，偏置电压 V_S 越小。

在实际应用中，大动态范围输入级和 CTIA 输入级所连接的光敏二极管为整体设计，负端 V_{ref} 所接参考电压需相同。在最大注入电流下估算栅压 V_{DI} 的好处是，当注入电流减小时，偏置电压 V_S 减小会使光敏芯片从原来的零偏变化到反偏，虽然引入了误差，但是比起光敏芯片正偏来说引入的误差更小。式(1)中 I_0 和注入管的宽长比(W/L)成正比，所以适当增加宽长比可以减少光敏芯片偏压的变化。

2.4 同步输出的时序设计

时序设计采用先积分后读出模式[7]，2×2 的阵列 CTIA 输入级信号通过列级信号处理电路，从 2 个 CTIA 总线输出级输出；大动态范围输入级信号通过列级信号处理电路，从 1 个 HDR 总线输出级输出。如图 10 所示，基本构成如下：FRAME TIME 代表每帧周期；PIXEL 代表像素内的时序；ROWSEL 代表行选控制时序，ROW[0]代表第一行的数据选通，以此类推；VOUT_CTIA 代表 CTIA

像素总线控制输出时序，COL[0-319]代表不同行输出第 1 列至第 320 列的数据；VOUT_HDR 代表大动态范围像素总线控制输出时序，COL[0-159]代表不同行输出第 1 列至第 160 列的数据。

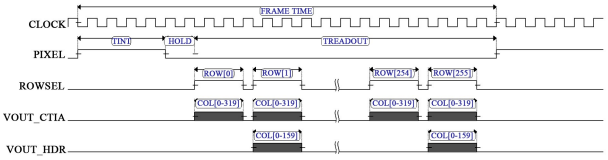


图 10　同步输出的时序设计图

3　仿真结果分析与版图

3.1　大动态范围分析

动态范围指饱和辐射功率 P_{sat} 与噪声等效辐射功率 P_{NE} 的比值，即：

$$R_{DR}=20\log\frac{P_{sat}}{P_{NE}} \tag{2}$$

也可定义为最大可探测电流和最小可探测电流之比，其中最小电流定义为无光照条件下的噪声电流或探测器暗电流。动态范围扩展公式定义如下：

$$R_{DR}=20\log(I_{CTIA}/I_{DARK})+20\log(I_{HDR}/I_{CTIA}) \tag{3}$$

由式(2)可知，多灵敏度的功能是通过将不同输入级的可探测电流范围相加得到更大的动态范围。

如图 11 所示，CTIA 曲线为 CTIA 模式下电路仿真的动态范围变化。按典型积分时间 1 ms，积分电容为 20 fF 估算，最大可探测电流约为 36 pA；最小可探测噪声电流水平与器件结电容、暗电流，以及焦平面读出噪声等参数相关，估算为 10 fA，则动态范围可达到 71 dB。

其次估算对数模式下根据光生电压得到的动态范围。根据已测得面积为 1 mm^2 的 InGaAs 光敏芯片中光生电流电压与光功率的数据，对像元中心距约为 10 μm 的光敏芯片按照光生电流与芯片面积成正比进行估算，当光功率在 0～2×10^{-8} W 的区间增加时，光生电压以对数模式从 0 增长到 0.4 V，光生电流以线性模式从 2.1×10^{-14} A 增长到 1.1×10^{-8} A。

由于光生电压是按对数模式增长的，而每一个光生电压都有相对应的光生电流和光功率，所以可以将探测到的光生电压换算成光生电流，从而对电路的动态范围向更高数量级做一个扩展补充，根据实测的数据进行的理论分析，如图 11 中 LOG 曲线所示，可将动态范围扩展到 121 dB。在实际应用中，弱光强下 CTIA 模式可探测微小信号；高光强下 LOG 模式可探测强烈信号，并在后期对两种模式输出的信号进行图像算法融合，实现动态范围拓展。

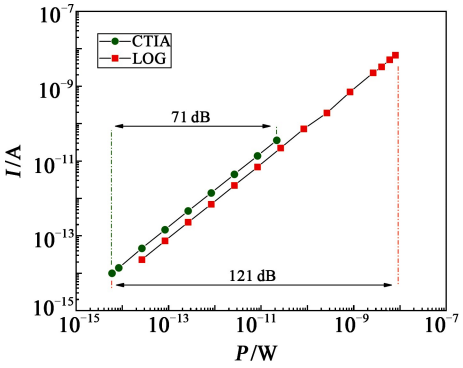


图 11　动态范围扩展示意图

3.2　线性度分析

为了对电路仿真结果进行验证和分析，搭建了 16×4 的阵列，输出速度为 10 MHz。输出结果如图 12 所示，V_1 为 CTIA 像素输出数据，从左到右依次为第 1 行 1～4 列输出结果，第 2 行 1～4 列输出结果，以此类推；V_2 为大动态范围像素输出数据，从左到右依次为第 1 行 1～4 列输出结果，第 2 行 1～4 列输出结果。为了节省版图布线资源成本，用 CTIA 的偶数行选通时序控制大动态范围像素行选通输出。

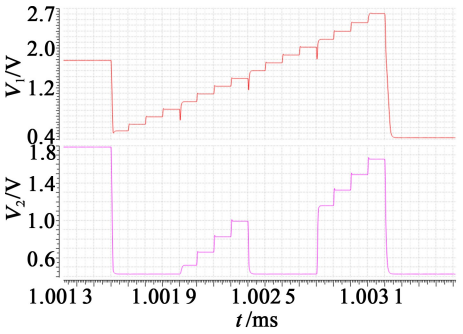


图 12　电路输出结果

CTIA 模式与对数模式输入与输出线性度分析如图 13、14 所示。结果表明，CTIA 模式输入与输出具有优良的线性关系，CTIA 模式输出线性度为 99.99%；考虑到光敏芯片在对数模式的光生电压实测数据，大动态范围输出级对数模式线性度为 99.93%。线性度公式为：

$$K=\left[1-\left(\frac{\delta}{N\times R}\right)\right]\times100\% \tag{4}$$

式中，δ 为总的偏差和，N 为数据点的数量，R 是数据点的范围。

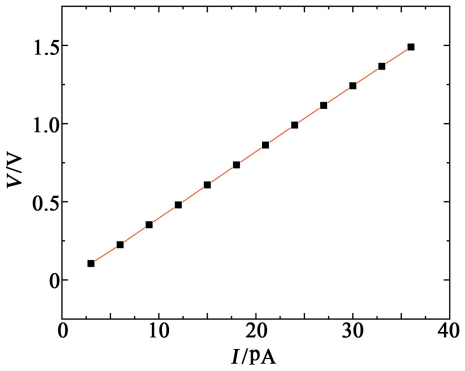


图 13 CTIA 模式线性度分析图

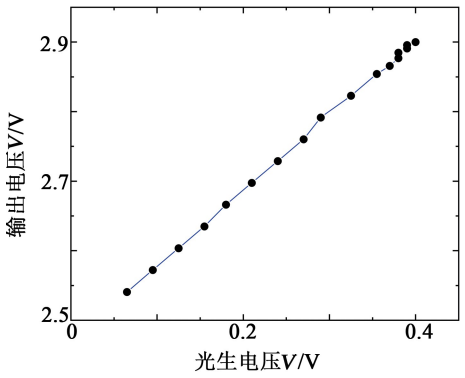


图 14 对数模式线性度分析图

3.3 版图分析

异形电路像元版图如图 15 所示，采用 0.18 μm 工艺进行设计，红色框内为 CTIA 单元电路，包含 CTIA 输入级电路，相关双采样电路和单元缓冲电路；绿色框内为大动态范围单元电路，包含大动态范围输入级电路和单元缓冲电路。CTIA 单元电路像元中心距为 15 μm，版图面积约为 200 μm^2，大动态范围单元电路版图面积约为 100 μm^2，异形电路像元总面积为 30 μm×30 μm。

同时基于 0.18 μm 工艺设计了异形电路像元阵列规模为 320×256（每 2×2 个像素阵列中再填充一个大动态范围像素）、像元中心距为 15 μm 的短波红外焦平面读出电路阵列版图。

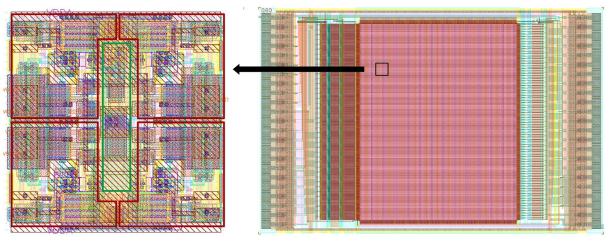


图 15 像元版图和阵列版图

4 结论

针对短波红外焦平面的高灵敏度大动态范围需求，设计了 CTIA 输入级和大动态范围输入级数量为 4∶1 布局方式的异形像元读出电路。基于 CTIA 输入级小积分电容结构，实现高灵敏度探测；基于 InGaAs 探测器光生电动势与辐射功率的对数关系，实现大动态范围探测。通过结合两种不同输入级的光功率探测范围，使动态范围扩展到 121 dB。

参考文献：

[1] 龚海梅，李 雪，张永刚. 铟镓砷光电探测器及其焦平面阵列[M]. 北京：科学出版社，2022：23.
Gong Haimei, Li Xue, Zhang Yonggang. InGaAs Photodetectors and Focal Plane Arrays[M]. Beijing: Science Press, 2022: 23.

[2] 李 雪，龚海梅，邵秀梅，等. 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展[J]. 红外与毫米波学报，2022，41(1)：129-138.
Li Xue, Gong Haimei, Shao Xiumei, et al. Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 129-138.

[3] 翟永成，丁瑞军. 320×256 大电荷容量的长波红外读出电路结构设计[J]. 红外与激光工程，2016，45(9)：73-78.
Zhai Yongcheng, Ding Ruijun. 320 × 256 LW IRFPA ROIC with large charge capacity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 73-78.

[4] 王绪泉，汪鸿祎，张永刚，等. 残差时间计数型 InGaAs 脉冲频率调制数字读出电路研究[J]. 光子学报，2022，51(5)：269-276.
Wang Xuquan, Wang Hongyi, Zhang Yonggang, et al. Study of residual-time-counting pulse frequency modulation digital readout circuit for InGaAs focal plane array[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5): 269-276.

[5] 高志远. 基于多次曝光技术的大动态范围 CMOS 图像传感器研究[D]. 天津：天津大学，2015：5-11.
Gao Zhiyuan. Study of wide dynamic range CMOS image sensors with multi-exposure technologies[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 5-11.

[6] Chou W, Yeh S, Chiu C, et al. A linear-logarithmic CMOS image sensor with pixel-FPN reduction and tunable response curve[J]. IEEE Sens. J., 2014, 14(5): 1625-1632.

[7] Huang S, Huang Z, Chen Y, et al. A low noise low power 512× 256 ROIC for extended wavelength InGaAs FPA[J]. Proc. SPIE, 2015, 9481: 94810M.

作者简介：

乔柏全（1998—），男，陕西省西安市人，硕士研究生，研究方向为短波红外焦平面多功能读出电路；

黄松垒（1984—），男，福建省莆田市人，博士，研究员，研究方向为低功耗大规模集成电路；

龚海梅（1965—），男，江苏省南通市人，博士，研究员，研究方向为新型红外焦平面探测器组件。